МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 620.178.162.42; 620.178.15 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-366-373

Исследование поверхности трибоконтакта после трения в водном растворе капроновой кислоты*

Е. Г. Дроган[1], В. Э. Бурлакова[2]**
[1,2] Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Tribocontact surface exploration after friction in hexanoic acid solution***

E. G. Drogan[1], V. E. Burlakova[2]**
[1,2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Работа посвящена исследованию эволюции коэффициента трения пары сплав медь-сталь при трении в водном растворе капроновой кислоты различной концентрации, а также изучению противоизносных свойств пары трения сталь-сталь при трении в маслянокислотной среде. Целью данного исследования являлось изучение влияния добавок капроновой кислоты на трибологические характеристики пар трения при фрикционном взаимодействии в составах на водной основе и на основе вазелинового масла.
Материалы и методы. Проведены трибологические исследования пары трения латунь-сталь на машине трения торцевого тира АЕ-5. Исследование противоизносных характеристик проводилось на четырехшариковой машине трения (ЧШМ) в соответствие со стандартом ГОСТ 9490–75. При испытаниях на ЧШМ объективными параметрами смазывающих свойств смазочных композиций являлись: нагрузка сваривания (Рс); диаметр пятна износа (Dн), критическая нагрузка (Рк). Параметры шероховатости сервовитной пленки определялись с помощью оптической профилометрии; ее микрогеометрия и структура на наноуровне — с помощью атомно-силовой микроскопии.
Результаты исследования. Изучены трибологические свойства трибосопряжения латунь-сталь в водных средах и сталь-сталь в средах на основе вазелинового масла. Установлена зависимость фрикционных характеристик пары трения латунь-сталь от концентрации карбоновой кислоты. Обнаружена ее оптимальная концентрация, обеспечивающая реализацию эффекта безызносности. Выявлено уменьшение шероховатости поверхности в результате фрикционного взаимодействия пары трения латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты по сравнению с исходной поверхностью трения вследствие формирования достаточно плотного слоя, образованного мелкозернистыми кластерами меди с малым разбросом частиц по размеру. Обнаружена зависимость триботехнических характеристик пары трения сталь-сталь

Introduction. The paper considers the evolution of friction coefficient of the pair of copper - steel alloy under friction in a hexanoic acid solution in various concentrations, and antiwear properties of the steel-steel friction pair in an oil-acidic medium. The work objective is to explore the effect of hexanoic acid additives on the tribological characteristics of friction pairs under the friction interaction in waterborne and paraffin-based formulations.
Materials and Methods. Tribological studies of a brass-steel friction pair were carried out on the AE-5 end-type friction machine. Antiwear characteristics were explored on a four-ball friction machine (FBW) in accordance with the standard GOST 9490–75. When tested at the FBW, the objective parameters of the lubricity of the oiling compositions were: welding load (Pc); wear spot diameter (Dн), critical load (Pк). Roughness parameters of the servovite film were determined through the optical profilometry; its microgeometry and structure at the nanoscale – through the atomic force microscopy.
Research Results. Tribological properties of the brass-steel tribocoupling in aqueous media and steel-steel one in petroleum paraffin-based media are studied. The dependence of the frictional characteristics of the brass-steel friction pair on the concentration of carboxylic acid is established. Its optimum concentration is specified, which provides the effect of wearlessness. A decrease in surface roughness is revealed as a result of the frictional interaction of a brass-steel friction pair in the hexanoic acid solution compared to the initial friction surface due to the formation of a sufficiently dense layer from fine-grained copper clusters with tight particle-size dispersion. The tribological characteristics of a steel-steel friction pair were found to depend on the composition of the



* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: ekaterina.drogan@gmail.com, vburlakova@donstu.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

от состава смазочной среды. Показано, что зависимость размера диаметра пятна износа от содержания кислоты в базовом масле имеет немонотонный характер с наличием ярко выраженного минимума при концентрации 0,1 масс. %. Критическая нагрузка ($Р_к$) при содержании 0,05 и 0,1 масс. % увеличивается на 32%, нагрузка сваривания ($Р_с$) — на 27 %.
Обсуждение и заключения. В результате трибологических исследований пары трения латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты выявлено, что оптимальной молярной концентрацией кислоты в составе смазки является 0,1 моль/л. При фрикционном взаимодействии пары латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты на поверхностях трения формируется антифрикционная медная пленка, способствующая резкому снижению коэффициента трения до 0,007 и износа металлов пары трения до 25 раз. В результате фрикционного взаимодействия пары трения латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты выявлено уменьшение шероховатости по сравнению с исходной поверхностью трения. Обнаружено, что фрикционное взаимодействие пары латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты приводит к значительной модификации поверхности трения в результате осаждения мелкодисперсных кластеров меди, образующихся в составе смазочной среды и формирующих сервовитную пленку. В результате исследований установлено, что зависимость размера диаметра пятна износа от содержания кислоты в базовом масле имеет немонотонный характер с наличием ярко выраженного минимума при концентрации 0,1 масс. %. Показано, что добавление 0,1 масс. % капроновой кислоты в состав смазочной композиции обнаруживает наименьший износ трибопары сталь-сталь, диаметр пятна износа при этом снижается до 0,497 мм, критическая нагрузка ($Р_к$) и нагрузка сваривания ($Р_с$) увеличиваются на 32% и 27 % соответственно.

Ключевые слова: коэффициент трения, избирательный перенос, сервовитная пленка, пятно износа, нагрузка сваривания, критическая нагрузка.

Образец для цитирования: Дроган, Е. Г. Исследование поверхности трибоконтакта после трения в водном растворе капроновой кислоты / Е. Г. Дроган, В. Э. Бурлакова // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, №4. — С. 366−373. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-366-373

lubricant. It is shown that the dependence of the size of the wear scar diameter (WSD) on the acid content in the base oil is nonmonotonic in nature with a pronounced minimum at a concentration of 0.1 mass. %. The critical load (Pк) at a content of 0.05 and 0.1 mass. % increases by 32%, welding load (Pc) - by 27%.
Discussion and Conclusions. As a result of the tribological studies of a brass-steel friction pair in the hexanoic acid solution, it has been found that the optimum acid molar concentration in the lubricant composition is 0.1 mol/L. Under the frictional interaction of a brass-steel pair in the hexanoic acid solution, an antifriction copper film is formed on the friction surfaces, which contributes to a sharp decrease in the friction coefficient to 0.007 and metal wear of the friction pair to 25 times. As a result of the frictional interaction of a brass-steel friction pair in the hexanoic acid solution, a decrease in roughness is revealed compared to the initial friction surface. It is found that the frictional interaction of a brass-steel pair in the hexanoic acid solution causes a significant modification of the friction surface as a result of the deposition of finely dispersed copper clusters occurring in the lubricating medium composition and forming a servovite film. As a result of studies, it is found that the dependence of the WSD size on the acid content in the base oil is nonmonotonic in nature with a significant minimum at a concentration of 0.1 mass. %. It is shown that the addition of 0.1 mass. % of hexanoic acid into the lubricant composition exhibits the smallest wear of the steel-steel tribological pair, the WSD decreases to 0.497 mm, the critical load (Pк) and the welding load (Pc) increase by 32% and 27%, respectively.

Keywords: friction coefficient, selective transfer, servovite film, wear scar, welding load, critical load

For citation: E.G. Drogan, V.E. Burlakova. Tribocontact surface exploration after friction in hexanoic acid solution. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 366−373. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-4-366-373

Введение. Вопросы трения и износа лежат в основе трибологии — науки о взаимодействии сопряжённых поверхностей контактирующих тел, находящихся в относительном движении. В авиакосмической и машиностроительной промышленности снижение трения и износа является одной из наиболее важных задач [1–3]. В настоящее время особое внимание для снижения трения и износа уделяется смазочным материалам с антифрикционными присадками, в качестве которых используются металлы или оксиды металлов с размерами частиц в нанодиапозоне [4–7]. Было установлено, что среди металлов, используемых в качестве модификаторов или металлоплакирующей добавки, медь проявляет большую тенденцию к снижению трения и износа в результате формирования на стальной поверхности металлической пленки с низкой прочностью на сдвиг на трущихся поверхностях [4]. Такая пленка при трении предотвращает прямой контакт стальных поверхностей. Исследования трибосопряженных поверхностей после трения на наноуровне выявляют зависимость эволюции коэффициента трения и износа трибопары от морфологии и физико-механических характеристик антифрикционной пленки [8, 9].

Необходимо отметить, что смазки на масляной основе с нанодобавками демонстрируют улучшенные трибологические характеристики, однако их использование неизбежно приводит к загрязнению окружающей среды. Повторное их использование является невозможным.

В связи с этим, целью данного исследования являлось изучение влияния добавок капроновой кислоты на трибологические характеристики пар трения при фрикционном взаимодействии в составах на водной основе и на основе вазелинового масла.

Материалы и методы. Эволюцию коэффициента трения системы «латунь 59–водный раствор карбоновой кислоты–сталь 40Х» исследовали на торцевой машине трения типа АЕ-5 со скоростью вращения 180 об/мин при осевой нагрузке 98 Н в течение 10 часов в лаборатории «Гибридные функциональные материалы на основе графена» НОЦ «Материалы». В качестве органической компоненты смазочной композиции использовали капроновую кислоту с концентрацией 0,025–0,5 моль/л.

Исследование противоизносных характеристик проводилось на ЧШМ в соответствие со стандартом ГОСТ 9490–75. Пара трения на ЧШМ сталь-сталь представляла собой точечные контакты шаров. Шары для испытаний изготавливались из стали ШХ-15 по ГОСТ 801–78, термически обрабатывались до твердости HRC 62–66. Диаметр шара d = 12,7 мм. При испытаниях на ЧШМ объективными параметрами смазывающих свойств смазочных композиций являлись: нагрузка сваривания ($P_с$); диаметр пятна износа ($D_и$), критическая нагрузка ($P_к$). Испытания на ЧШМ проводились в двух режимах: испытания в течение 3600 секунд при постоянной нагрузке для определения величины износа испытуемых образцов путем измерения диаметров пятна износа каждого из трех шаров с использованием микроскопа ММУ-1 №660002; испытания в течение 10 секунд при повышенной нагрузке до сваривания шаров для определения значений $P_к$, $P_с$. Полученные числовые значения аппроксимированы методом наименьших квадратов. В качестве смазочной композиции (эмульсии) для испытаний на ЧШМ использовали вазелиновое масло с добавлением различной концентрации капроновой кислоты. Испытания проводились при концентрации кислоты в базовом вазелиновом масле 0,025–05 моль/л.

Для определения толщины сервовитной пленки, полученной на поверхности трибоконтакта в результате фрикционного взаимодействия пары трения латунь-сталь, а также параметров ее шероховатости использовали оптический профилометр Contour GT-K1 с аналитическим программным обеспечением Vision 64, установленном в РЦКП НОЦ «Материалы» (nano.donstu.ru). Измерения проводились методом вертикальной сканирующей интерферометрии (VSI) со скоростью сканирования 0,1 мкм/сек, при повторяемости RMS 0,01 нм.

Изучение топографии поверхности сервовитной пленки осуществлялось методом атомно-силовой микроскопии. Сканирование поверхности пленки проводили с использованием атомно-силового микроскопа марки PHYWE Compact в полуконтактном режиме монокристаллическим кремниевым зондом с алюминиевым покрытием.

Результаты исследования. Проведенные длительные эволюционные трибологические исследования пары трения латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты обнаруживают зависимость трибологических характеристик от концентрации кислоты в смазочной среде. Анализ изменения коэффициента трения пары латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты с концентрациями 0,025 и 0,05 моль/л выявляет достаточно низкие до 0,07 значения [8, 9]. Дальнейшее увеличение концентрации кислоты в составе смазки до 0,2 и 0,5 моль/л, напротив, приводит к увеличению коэффициента трения (рис. 1).

Как следует из полученных результатов, в период приработки трибопары наблюдается тенденция к снижению коэффициента трения. Однако при введении высокой концентрации кислоты инициируются также и коррозионные процессы на поверхности контакта. Использование капроновой кислоты в смазочной композиции с концентрацией 0,1 моль/л позволяет достичь наименьших значений коэффициента трения до 0,007 при длительных трибологических испытаниях, образования сервовитной пленки и перехода системы в режим безызносного трения [10, 11]. Одновременно с этим снижается износ пары трения латунь-сталь до 25 раз, а на трибосопряженных поверхностях в результате избирательного переноса при трении формируется медная пленка с различной шероховатостью и плотностью покрытия поверхности.

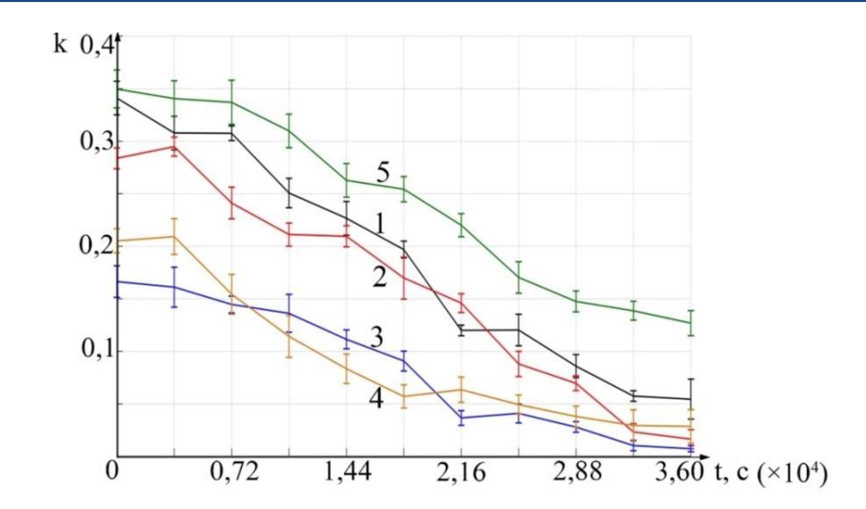


Рис. 1. Эволюция коэффициента трения в системе«латунь-водный раствор капроновой кислоты-сталь» с концентрацией кислоты: 1 — 0,025 моль/л; 2 — 0,05 моль/л; 3 — 0,1 моль/л; 4 — 0,2 моль/л; 5 — 0,5 моль/л

Сравнение параметров шероховатости образующейся антифрикционной медной пленки при сканировании поверхности методом оптической профилометрии обнаруживает существенные отличия от исходной топографии. В результате фрикционного взаимодействия пары трения латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты выявлено уменьшение шероховатости до R_a равное 69,4 нм (рис. 3), по сравнению с шероховатостью исходной поверхности трения R_a равно 118 нм (рис. 2).

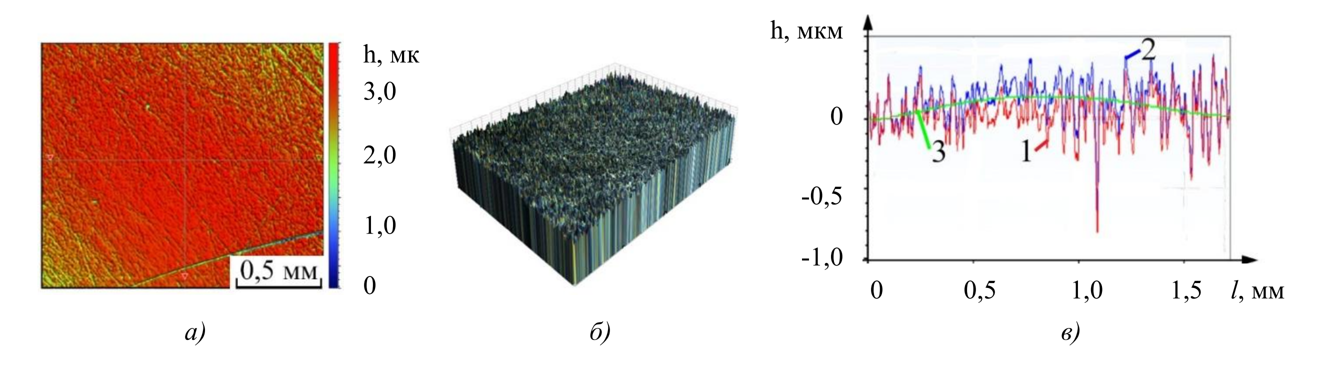


Рис. 2. Результаты исследования стальной поверхности до трения методом оптической профилометрии: а — 2D-визуализация, б — 3D-визуализация, в — профиль поверхности. 1 — профиль шероховатости; 2 — профиль сканирования поверхности; 3 — профиль волнистости

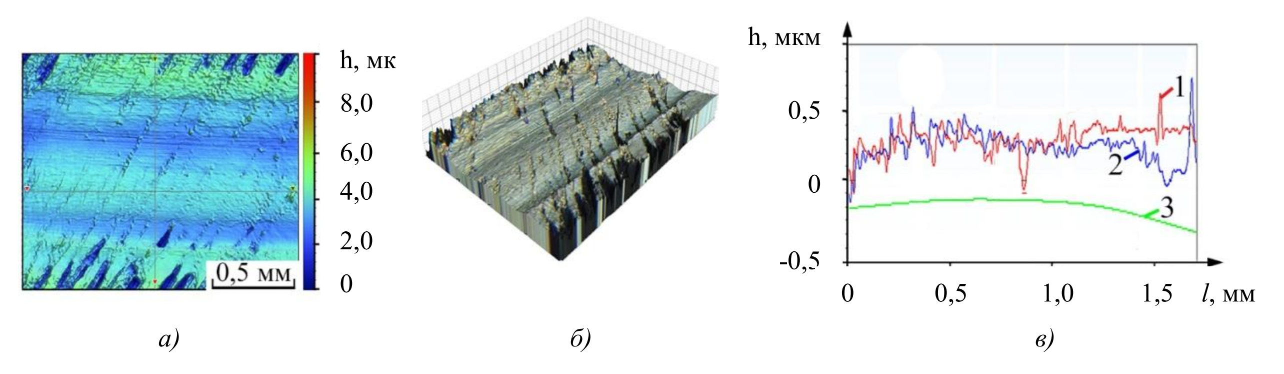


Рис. 3. Результаты исследования поверхности после трения методом оптической профилометрии: а — 2D-визуализация; б — 3D-визуализация; в — профиль поверхности. 1 — профиль шероховатости; 2 — профиль сканирования поверхности; 3 — профиль волнистости

Поверхность после трения представляет собой расположенные параллельно направлению скольжения наноканавки, что характерно при образовании меньшего количества и размера частиц продуктов износа в смазке [12]. Такое состояние фрикционной системы приводит к существенному уменьшению коэффициента

трения. Известно [13–15], что наноразмерные неровности, как правило, оказывают меньшее влияние на износостойкость поверхности, чем их микронные аналоги из-за их почти бездефектной структуры. Кроме того, наличие наноразмерных неровностей способствует уменьшению площади контакта и увеличивает гидрофобность поверхности [16], что приводит к уменьшению сил сцепления при трении в водных растворах. В связи с этим наноструктурные пленки имеют огромный потенциал в процессах обеспечения снижения коэффициента трения и защиты поверхностей от износа.

Дальнейшее приближение к поверхности трения при анализе результатов атомно-силовой микроскопии показывает, что фрикционное взаимодействие пары латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты приводит к значительной модификации поверхности трения в результате осаждения мелкодисперсных кластеров меди, образующихся в составе смазочной среды [17] и формирующих сервовитную пленку (рис. 4).

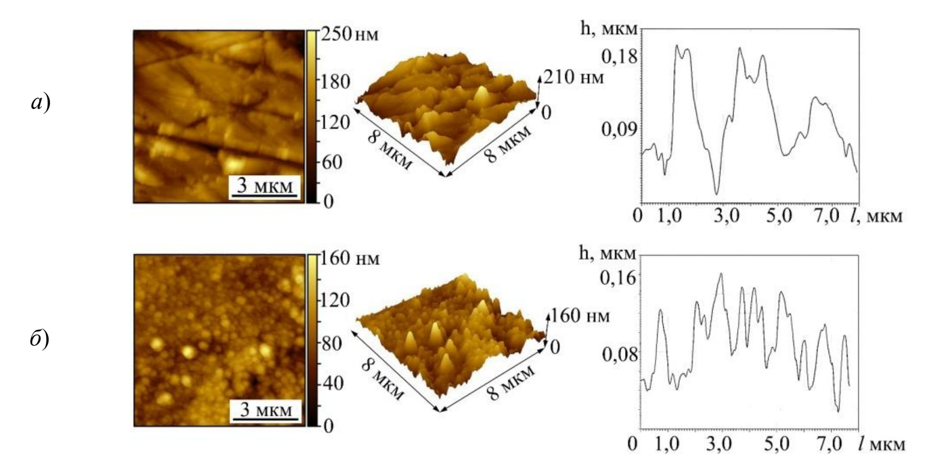


Рис. 4. Результаты атомно-силовой микроскопии поверхности образца:
а — до трения; б — после трения пары латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты

В результате визуализации обнаруживается, что стальная поверхность после фрикционного взаимодействия в водном растворе капроновой кислоты выглаживается, покрывается мелкозернистыми кластерами меди [18, 19] вследствие их адсорбции из состава рабочей среды на контртело (рис. 4). При этом слой, сформированный на поверхности, достаточно плотный, с малым разбросом частиц по размеру.

Для изучения влияния капроновой кислоты на противоизносные свойства смазочного материала интересно было рассмотреть пару трения сталь-сталь. Для этого использовали вазелиновое масло, в состав которого вводили от 0,025 до 0,5 масс. % капроновой кислоты в виде добавки. Результаты испытаний указывают на изменение трибологических параметров модифицированного масла. В результате исследований установлено, что зависимость размера диаметра пятна износа ($D_и$) от содержания кислоты в базовом масле имеет немонотонный характер с наличием ярко выраженного минимума при концентрации 0,1 масс. % (рис. 5). Добавление капроновой кислоты в состав смазочной композиции в качестве модифицирующей добавки обнаруживает наименьший износ трибопары при концентрации кислоты 0,1 масс. %. Диаметр пятна износа при этом снижается до 0,497 мм, в то время как диаметр пятна износа при трении пары сталь-сталь в чистом вазелиновом масле составляет 0,664 мм. При концентрации 0,025 масс. % и 0,5 масс. % отмечается ухудшение трибологических характеристик пары трения. При трении в базовом масле с добавлением капроновой кислоты с концентрацией 0,05 масс. % и 0,2 масс. % наблюдается лишь незначительное уменьшение диаметра пятна износа.

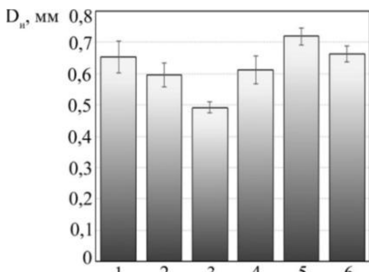


Рис. 5. Зависимость диаметра пятна износа ($D_и$) от концентрации капроновой кислоты в составе вазелинового масла:
1 — 0,025 масс. %, 2 — 0,05 масс. %, 3 — 0,1 масс. %, 3 — 0,2 масс. %, 5 — 0,5 масс. %,
6 — чистое вазелиновое масло

Исследование прочности модифицированной масляной пленки по нагрузочной способности смазочной композиции в сравнении с базовым маслом выявило изменение предельной несущей способности смазочного материала. При трении в вазелиновом масле с добавлением капроновой кислоты с концентрацией 0,025 масс. % наблюдается незначительное увеличение критической нагрузки в сравнении с чистым базовым маслом (рис. 6).

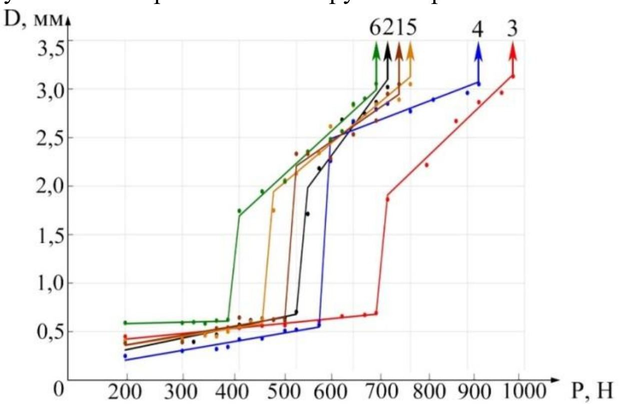


Рис. 6. Несущая и предельная нагрузочные способности вазелинового масла, модифицированного капроновой кислотой разной концентрации (C):
1 — чистое вазелиновое масло (ВМ); 2 — ВМ + 0,025 масс. %; 3 — ВМ + 0,05 масс. %; 4 — ВМ + 0,1 масс. %;
5 — ВМ + 0,2 масс. %; 6 — ВМ + 0,5 масс. %

При достижении критической нагрузки трущиеся поверхности пары сталь-сталь значительно нагреваются, адсорбционная пленка, образующаяся в базовом масле, разрушается, трение усиливается, а поверхности металла свариваются в точках их соприкосновения (рис. 6). Капроновая кислота, введенная в базовое масло, реагирует со стальной поверхностью трения, образуя на выступах контактирующих поверхностей более стойкую хемосорбционную пленку, предохраняющую поверхности от износа и уменьшающую трение в условиях высокой температуры и давления, благодаря чему трущиеся поверхности выравниваются, износ снижается.

Наилучший результат при трении пары сталь-сталь наблюдается в вазелиновом масле, модифицированном капроновой кислотой с концентрациями 0,05 и 0,1 масс. %, критическая нагрузка ($P_к$) при этом увеличивается на 32%, нагрузка сваривания ($P_с$) увеличивается на 27 % (рис. 5). Дальнейшее увеличение концентрации капроновой кислоты до 0,2 масс. % и 0,5 масс. % в составе смазочной композиции уже отрицательно сказывается на ее несущей и предельной нагрузочной способности.

Обсуждение и заключения. Полученные в работе результаты позволяют сформировать следующие выводы:

- В результате трибологических исследований пары трения латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты выявлено, что оптимальной молярной концентрацией кислоты в составе смазки является 0,1 моль/л.
- При фрикционном взаимодействии пары латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты на поверхностях трения формируется антифрикционная медная пленка, способствующая резкому снижению коэффициента трения до 0,007 и износа металлов пары трения до 25 раз.
- В результате фрикционного взаимодействия пары трения латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты выявлено уменьшение шероховатости, по сравнению с исходной поверхностью трения.
- Обнаружено, что фрикционное взаимодействие пары латунь-сталь в водном растворе капроновой кислоты приводит к значительной модификации поверхности трения в результате осаждения мелкодисперсных кластеров меди, образующихся в составе смазочной среды, и формирующих сервовитную пленку.
- В результате исследований установлено, что зависимость размера диаметра пятна износа от содержания кислоты в базовом масле имеет немонотонный характер с наличием ярко выраженного минимума при концентрации 0,1 масс. %.
- Показано, что добавление 0,1 масс. % капроновой кислоты в состав смазочной композиции обнаруживает наименьший износ трибопары сталь-сталь, диметр пятна износа при этом снижается до 0,497 мм, критическая нагрузка ($P_к$) и нагрузка сваривания ($P_с$) увеличиваются на 32% и 27 % соответственно.

Библиографический список

1. Ludema, K. C. Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology / K. C. Ludema, L. Ajayi. — CRC press. — 2018. — 82 p.

2. Hutchings, I. Tribology: friction and wear of engineering materials / I. Hutchings, P. Shipway. — Butterworth Heinemann. — 2017. — 389 p.

3. Kato, K. Wear in relation to friction–a review / K. Kato // Wear. — 2000. — Vol. 241, no. 2. — P. 151–157. DOI : 10.1016/S0043-1648(00)00382-3

4. Liu, G. Investigation of the mending effect and mechanism of copper nano-particles on a tribologically stressed surface / G. Liu [et al.] // Tribology Letters. — 2004. — Vol. 17. — P. 961–966. DOI: 10.1007/s11249-004-8109-6

5. A. Hernández Battez. CuO, ZrO2 and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricant / A. Hernández Battez [et al.] // Wear. — 2008. — Vol. 265. — P. 422–428. DOI : 10.1016/j.wear.2007.11.013

6. Uflyand, I. E. Metal chelate monomers based on nickel (II) cinnamate and chelating N-heterocycles as precursors of nanostructured materials / I. E. Uflyand [et al.] // Journal of Coordination Chemistry. — 2019. — Vol. 72, no. 5–7. — P. 796–813. DOI : 10.1080/00958972.2019.1587414

7. Peng T. The influence of Cu/Fe ratio on the tribological behavior of brake friction materials / T. Peng [et al.] // Tribology Letters. — 2018. —Vol. 66, no. 1. — P. 18. DOI : 10.1007/s11249-017-0961-2

8. Механические свойства сервовитных пленок, формирующихся при трении в водных растворах карбоновых кислот / В. Э. Бурлакова [и др.] // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, №. 3. — С. 280–288. DOI : 10.23947/1992-5980-2018-18-3-280-288

9. Menezes, P. L. Role of surface texture, roughness, and hardness on friction during unidirectional sliding / P. L. Menezes [et al.] // Tribology letters. — 2011. — Vol. 41(1). — P. 1–15. DOI : 10.1007/s11249-010-9676-3

10. Бурлакова, В. Э. Трибологические возможности пары трения латунь-сталь в водных растворах органических кислот / В. Э. Бурлакова, Е. Г. Дроган, Д. Ю. Геращенко // Трибология-машиностроению: сб. трудов XII междунар. науч.-техн. конф. — Ижевск, 2018. — С. 92–95.

11. Бурлакова, В. Э. Влияние концентрации органической кислоты в составе смазки на трибологические характеристики пары трения / В. Э. Бурлакова, Е. Г. Дроган // Вестник Донского гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, №. 1. — С. 24–30. DOI : 10.23947/1992-5980-2019-19-1-24-30

12. Gerberich, W. W. Superhard silicon nanospheres / W. W. Gerberich [et al.] // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. — 2003. — Vol. 51, no. 6. — P. 979-992. DOI : 10.1016/S0022-5096(03)00018-8

13. Saurín, N. Study of the effect of tribomaterials and surface finish on the lubricant performance of new halogen-free room temperature ionic liquids / N. Saurín [et al.] // Applied Surface Science. —2016. — Vol. 366. — P. 464-474. DOI : 10.1016/j.apsusc.2016.01.127

14. Jansons, E. The Impact of Ice Texture on Coefficient of Friction for Stainless Steel with Different Surface Roughness. Key Engineering Materials / E. Jansons, K. A. Gross // Trans Tech Publications. —2019. —Vol. 800. — P. 308-312 DOI : 10.4028/www.scientific.net/KEM.800.308

15. Qin, W. Effects of surface roughness on local friction and temperature distributions in a steel-on-steel fretting contact / W. Qin [et al.] // Tribology International. — 2018. — Vol. 120. — P. 350–357. DOI : 10.1016/j.triboint.2018.01.016

16. Choi, C. H. Nanoturf surfaces for reduction of liquid flow drag in microchannel / C. H. Choi, J. Kim, C.J. Kim // ASME 3rd Integrated Nanosystems Conference. American Society of Mechanical Engineers. — 2004. — P. 47–48. DOI : 10.1115/NANO2004-46078

17. Burlakova, V. E. Nanotribology of Aqueous Solutions of Monobasic Carboxylic Acids in a Copper Alloy–Steel Tribological Assembly / V. E. Burlakova [et al.] // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2018. — Vol. 12, no. 6. — P. 1108–1116. DOI : 10.1134/S1027451018050427

18. Влияние состава смазочной среды на структуру поверхностных слоев формирующейся при трении сервовитной пленки / В. Э. Бурлакова [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2019. — №. 4. — С. 91–99. DOI : 10.1134/S0207352819040061

19. Wolff, C. A. newly developed test method for characterization of frictional conditions in metal forming / C. Wolff, O. Pawelski, W. Rasp // Proceedings of the Eighth International Conference on Metal Forming. — Krakow. — 2000. — P. 91–97.

Сдана в редакцию 30.09.2019
Принята к публикации 02.12.2019

Об авторах:

Бурлакова Виктория Эдуардовна,
заведующая кафедрой «Химия» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3779-7079
vburlakova@donstu.ru

Дроган Екатерина Геннадьевна,
старший преподаватель кафедры «Химия» Донского государственного технического университета, (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-4002-2082
ekaterina.drogan@gmail.com